

VHF 帯および UHF 帯における 誘電率およびテンソル透磁率の測定

志 方 泰

1. 緒 言

最近の数年間において低周波マイクロ波である UHF 帯の利用が盛に行なわれてきつつある。その一つは散乱波通信、UHF テレビジョンなどに見られる様に通信に関する応用であり、他の一つの例としては、高周波処理用としての高電力エネルギーに関する応用である⁽¹⁾。そのいずれの場合にせよこれらの装置には特性のよいサキュレータ或はアイソレータが必要である。筆書は大電力サキュレータとして、従来導波管外部から液冷にしている形式を、導波管内部にまで冷却液を流してより小型電力化を行なうことおよび微小化の一方法としてフェライト周囲に磁石を配置した単方向性素子を考えたのでこれを紹介すると共に、これに必要なフェライトのテンソル透磁率および冷却液の測定を行なったのでその結果をあはせてここに発表する次第である。

2. 測定の原理

測定は摂動法を用いて行なった。この場合摂動公式は第 1 式の通りである。

$$\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega_0^2} = 2\Delta\lambda/\lambda - j1/Q_s = \int_{V_r} p \vec{E}_a^2 dV + \int_{V_r} m \vec{H}_a^2 dV \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに

$\int_{V_r} dV$ は試料部分にいつての積分、 V は共振器の体積、 Q_s は試料の Q 、 $\Delta\lambda/\lambda$ は波長変化率、 \vec{H}_a 、 \vec{E}_a はそれぞれ磁界および電界の固有函数を示すベクトル、 m は磁化、 p は分極である。

\vec{E}_a および \vec{H}_a は共振器全体については

$$\int_V \vec{E}_a^2 dV = 1 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\int_V \vec{H}_a^2 dV = 1 \quad \dots\dots\dots(3)$$

である。

ここに $\int_V dV$ は共振器全体についての積分である。

また

$$1/Q_s = 1/Q_c - 1/Q_r \quad \dots\dots\dots(4)$$

で与えられる。

ここに Q_r は共振器自体の Q 、 Q_c は直接測定される Q である。

モード	同軸 TEMモード	円筒又は矩形 H _{1mn} モード	円筒 H _{01n} モード	円筒H ₀₁₀ モード の空洞共振器 は存在しない
α_μ	1	$\eta^2 \lambda^2 / 4l^2$	$3.094 / \{1 + (\lambda c / 2l)^2\}$	
z	$\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon \dot{\mu}} t$	$\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \epsilon \dot{\mu} - \left(\frac{2\pi}{\lambda c}\right)^2} t$	$\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \epsilon \dot{\mu} - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} r$	

モード	同軸 TEMモード	円筒又は矩形 H _{1mn} モード	円筒E _{01n} モード	円筒E ₀₁₀ モード
α_ϵ	1		$1.855 / \{1 + (\lambda c / 2l)^2\}$	1.855
z	$\frac{1-2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon \dot{\mu}} t$		$\sqrt{(2\pi/\pi)^2 \epsilon \mu - n\pi/l} \frac{r}{2}$	$(2\pi/\lambda) \sqrt{\epsilon \dot{\mu}} r$
$f(Z)^*$	tanZ/Z		$2J_1(Z) / J_0(Z)$	

第1図 ϵ 及び $\dot{\mu}$ 測定に於ける共振器の例と定数

ここにおいて、1式によって $\dot{\mu}$ を測定するには $\vec{E}_a = 0$ の箇所に試料を置き、 $\dot{\epsilon}$ を測定するためには $\vec{H}_a = 0$ の箇所に試料を置けばよい。この様にする事により、かつ試料の形状を適当に選ばば（例えば円板型磁性材料であれば、厚さを直径より充分小さくとする。）

$$m = \dot{\mu} - 1 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$p = \dot{\epsilon} - 1 \quad \dots\dots\dots(6)$$

となり、
振動公式は

$$\Delta\lambda/\lambda - j 1/2Q_s = -\frac{1}{2} \int_{V'} m \vec{H}_a^2 dV = \alpha_\mu (\dot{\mu} - 1) \left(\frac{\Delta V}{V} \right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\Delta\lambda/\lambda - j 1/2Q_s = -\frac{1}{2} \int_{V'} p \vec{E}_a^2 dV = \alpha_\epsilon (\dot{\epsilon} - 1) \left(\frac{\Delta V}{V} \right) \quad \dots\dots\dots(8)$$

となる。(2), (3) ここに ΔV は試料の体積, α_μ および α_ϵ は共振モードと試料の形状で定る定数である。

$\Delta\lambda/\lambda$, および $1/Q_s$ が数%以上にもなると, 形状効果により(7)式および(8)式は

$$\Delta\lambda/\lambda - j 1/2Q_s = \alpha_\epsilon \left\{ \dot{\epsilon} f(Z) - 1 \right\} \left(\frac{\Delta V}{V} \right) \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\Delta\lambda/\lambda - j 1/2Q_s = \alpha_\mu \left\{ \dot{\mu} f(Z) - 1 \right\} \left(\frac{\Delta V}{V} \right) \quad \dots\dots\dots(10)$$

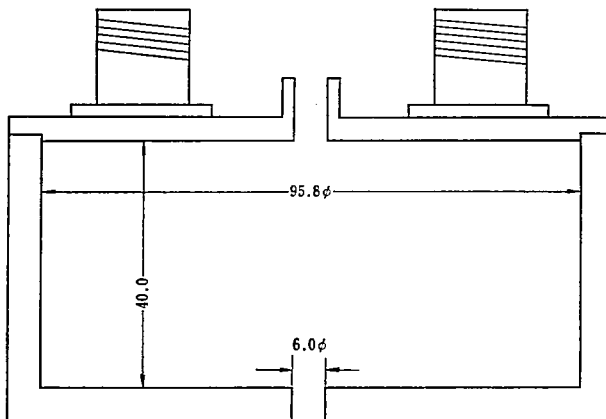
と表される。各種空洞共振器についての測定の試料の位置, α_μ , α_ϵ , Z , および $f(Z)$ の値は第1図に示した通りである。これらにより, 試料の形状の大小を問はず, Q_c , Q_r , λ , および $\Delta\lambda$ を測定によって求めれば, $\dot{\mu}$ および $\dot{\epsilon}$ が得られる次第である。

3. $\dot{\epsilon}$ 測定用共振器

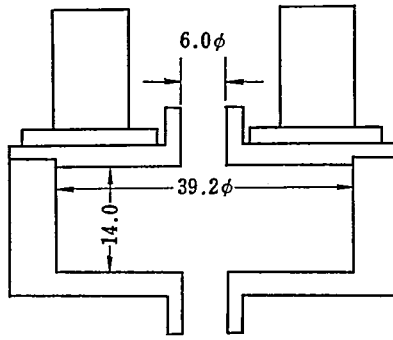
ここで必要な誘電率は, $\dot{\epsilon} = \epsilon_1 - j\epsilon_2$ として ϵ_1 , および ϵ_2 を求めることである。従って共振器は簡単であって, 400MHz, および 1GHz の測定に対しては半同軸型空洞共振器, 3GHz および 10GHz の測定に対しては新に設計を行なった円筒 TM_{010} 空洞共振器を用いた。後二者については直径は

$$fD = 2.29 \times 10 \quad (GHz \cdot Cm) \quad \dots\dots\dots(11)$$

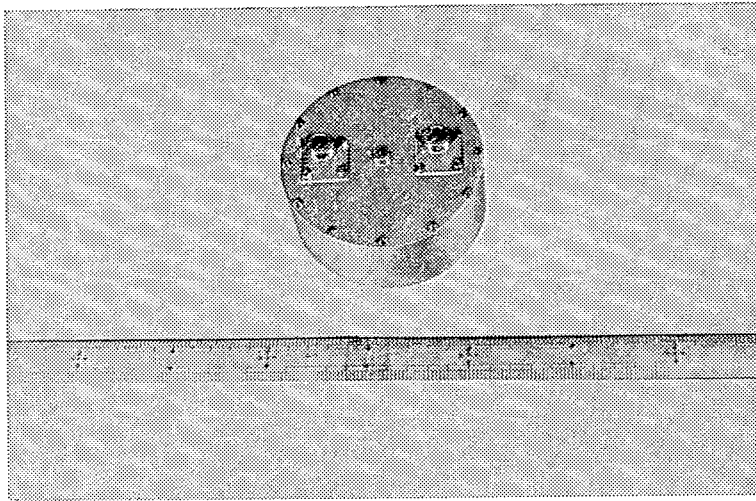
により計算される。今回の実験においては, 2.4 GHz および 9 GHz として設計を行なったので直径はそれぞれ 95.8 mm および 39.2 mm 高さは他のモードなどを考慮した結果それぞれ 40.0 mm および 14.0 mm とした。これらは第2図, 第3図として, 又その写真は第4図, 第5図としてそれぞれ示した通りである。



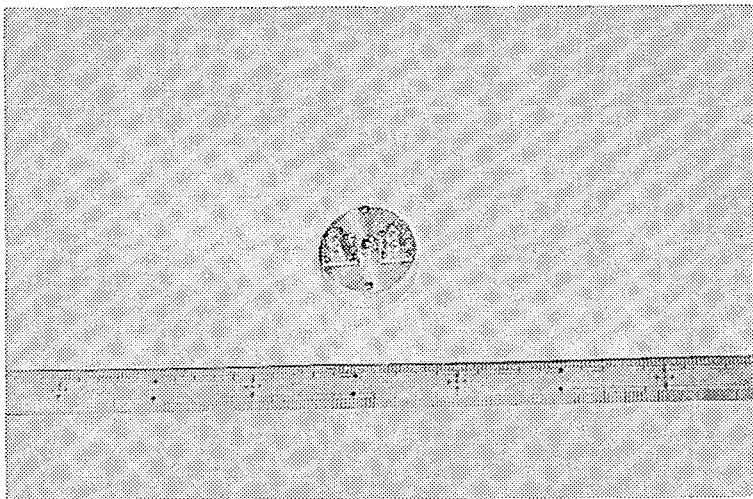
第2図 2.4 GHz TM_{010} 空洞共振器



第 3 圖 9GHz TM_{010} 空洞共振器



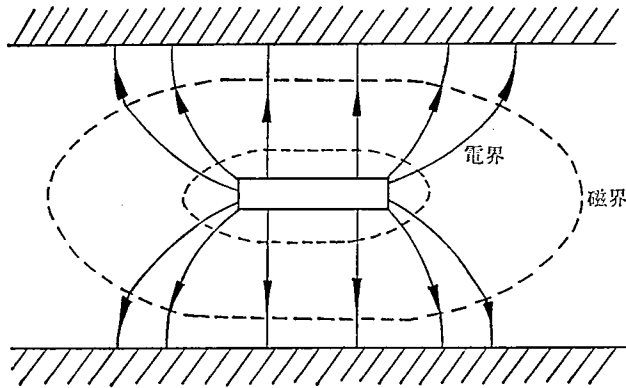
第 4 圖 TM_{010} 2.4 GHz 空洞共振器



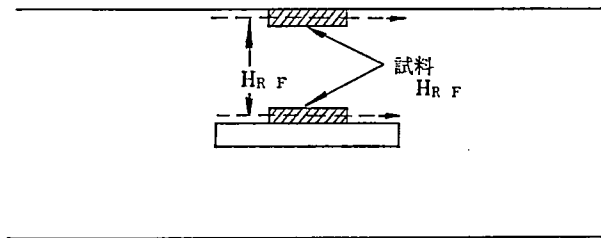
第 5 圖 TM_{010} 9.0 GHz 空洞共振器

4. μ 測定用共振器

この周波数帯でのいわゆる普通透磁率は同軸 $\lambda/4$ 共振器にリング試料を挿入して測定されている。⁽⁴⁾ しかし同軸共振器においては、磁界は平行でなく丸く閉じている。強磁性共鳴の実験を行なうには平行磁界が必要となり、このため矩形 H_{10n} 空洞共振器等を用いる次第であるが、これら空洞共振器を 1 GHz 以下の周波数帯において用いようとするとその寸法が大きくなり過ぎて取扱い上不便であるが、これはストリップライン共振器を用いることで解決できる。

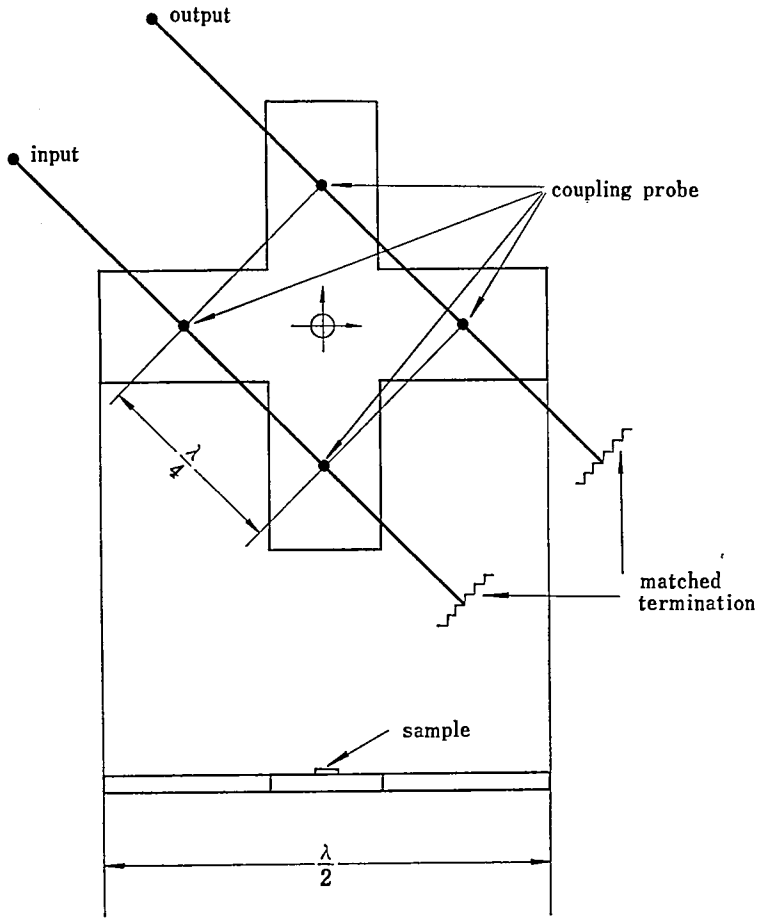


第 6 図 ストリップラインに於ける電界及び磁界



第 7 図 試料の位置

ストリップライン共振器の磁界は第 6 図に示した様に内外の導体間にはほぼ一様な平行磁界が存在するのでここに第 7 図に示した位置に薄円板試料を置けば強磁性共鳴の実験が行なえる。目的としているサーキュレータ、アイソレータ等においては、テンソル透磁率が必要になるが、この測定を行なうには、直交している 2 つのモードの縮退しているものを選び、各モードを $\pi/4$ だけ位相を変化させて励振させれば円偏波励振が行なえて測定が可能となる。これをストリップラインで実現させるには第 8 図に示した通り $\lambda/2$ 長、両端開放の同長の共振器を二組直交させ、位相を 90° ずらせて励振し、再び位相が重る様に検波させればよい。交点は円偏波となっているからここに薄円板試料を置けばテンソル透磁率の測定が行なえる。⁽⁵⁾



第 8 図 十字ストリップライン共振器

さて、この二つの縮退した共振モードをそれぞれモード 1，モード 2 と呼ぶ。このとき振動公式は一般式より

$$\begin{vmatrix} H_{11} - \omega^2 & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} - \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad \dots\dots\dots(12)$$

である。

ここに

$$\left. \begin{aligned} H_{11} &= \omega_0^2 - \omega^2 m_{11} \left(\frac{\Delta V}{V} \right) \alpha_\mu \\ H_{12} &= m_{12} \left(\frac{\Delta V}{V} \right) \alpha_\mu \\ H_{21} &= m_{21} \left(\frac{\Delta V}{V} \right) \alpha_\mu \\ H_{22} &= m_{22} \left(\frac{\Delta V}{V} \right) \alpha_\mu \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

で表される。 $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)$ なる係数は(1), (5), (7)式より容易に類推される。

(13)式を(12)式に代入して解くと、

$$\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega_0^2} = \alpha_\mu \frac{(\dot{\mu} \pm \dot{\alpha}) - 1}{1 + N(\dot{\mu} \pm \dot{\alpha} - 1)} \left(\frac{\Delta V}{V}\right) \quad \dots\dots\dots(14)$$

が得られる。試料を前述のように薄円板とすると $N \approx 0$ となり近似的に

$$\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega_0^2} = \alpha_\mu \{(\dot{\mu} \pm \dot{\alpha}) - 1\} \left(\frac{\Delta V}{V}\right) \quad \dots\dots\dots(15)$$

が求められる。これを計算に便利なように実部と虚部とに分離すると(15)式は

$$R \left[\alpha_\mu \{(\dot{\mu} \pm \dot{\alpha}) - 1\} \left(\frac{\Delta V}{V}\right) \right] = \Delta\lambda/\lambda = \alpha_\mu (\mu_1 \pm \alpha_1 - 1) \left(\frac{\Delta V}{V}\right) \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$I_m \left[\alpha_\mu \{(\dot{\mu} \pm \dot{\alpha}) - 1\} \left(\frac{\Delta V}{V}\right) \right] 1/Q_s = 2\alpha_\mu (\mu_1 \pm \alpha_2) \left(\frac{\Delta V}{V}\right) \quad \dots\dots\dots(17)$$

となる。

ここに問題になる点は、先づストリップラインの長さを ℓ 、断面積を S 、等価断面積を S_{eff} とすると、 $V = S\ell$ ではなく、

$$V = S_{eff} \ell \quad \dots\dots\dots(18)$$

で与えられることである。ストリップラインの巾を W 、外部導体間隔を b とすると、電界は拡がっているので

$$S_{eff} = (W + W')b \quad \dots\dots\dots(19)$$

である。 W' は Oliner 等により⁽⁷⁾

$$W' = \frac{2b}{\pi} \ell_n 2 + \frac{t}{\pi} \left(1 - \ell_n \frac{2t}{b}\right) \quad \dots\dots\dots(20)$$

が与えられている。ここに t はストリップラインの厚さである。これを考慮すると、

α_μ は $\alpha_{\mu'}$ 即ち

$$\alpha_{\mu'} = \alpha_\mu \frac{W}{W + W'} \quad \dots\dots\dots(21)$$

としなければならない。

次にはストリップラインの内外導作上の電流は一定ではない。

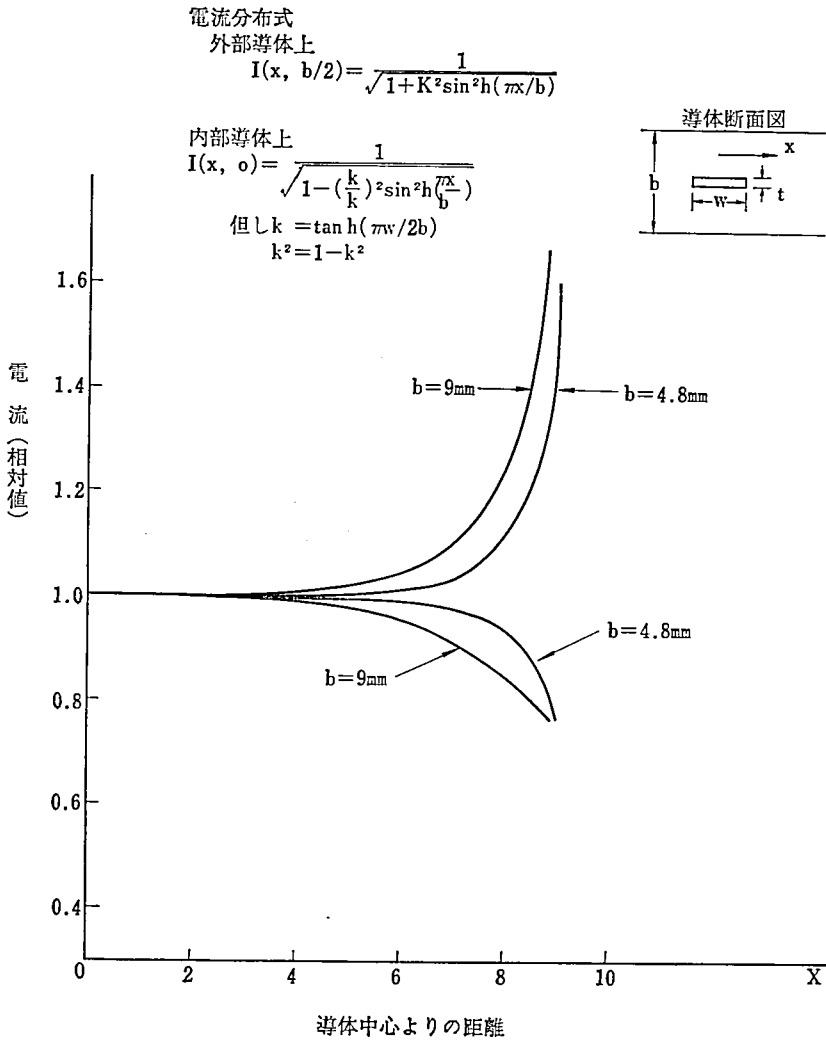
電流分布は、内部導作上では

$$I(x, 0) = \frac{I_0}{\sqrt{1 - (K'/K) \sin^2 h(\pi x/6)}} \quad \dots\dots\dots(22)$$

外部導作上では

$$I(x, b/2) = \frac{I_0}{\sqrt{1 - K^2 \sin^2 h(\pi x/b)}} \quad \dots\dots\dots(23)$$

である。⁽⁴⁾、⁽⁸⁾これは第9図に示した通りである。



第 9 図 内部及び外部導体上の電流分布

摂動方程式は内部導体上においては

$$\int_{V'} m \vec{H}_a^2 dV \cong 2qS \int_0^{\frac{D}{2}} I^2(x, 0) dx = 2 \int_0^{\frac{D}{2}} \frac{dx}{1 - (K'/K)^2 \sin^2 h(\pi x/b)}$$

$$= \frac{bmqS}{\pi} \cdot \frac{I_0^2}{\sqrt{1 + (K'/K)^2}} \cdot \ell_n \left(\frac{\sqrt{1 + \sin^2 h(\pi D/2b)} + \sin h(\pi D/2b)}{\sqrt{1 + \sin^2 h(\pi D/2b)} - \sin h(\pi D/2b)} \sqrt{\frac{1 + (K'/K)^2}{1 - (K'/K)^2}} \right) \dots\dots\dots(24)$$

外部導体上では

$$\int_{V'} m \vec{H}_a^2 dV \cong 2qS \int_0^{\frac{D}{2}} I^2(x, b/2) dr$$

$$= \frac{bmqS}{\pi} \cdot \frac{I_0^2}{\sqrt{1-K^{12}}} \ell_n \left(\frac{\sqrt{1+\sin^2 h(\pi D/2b)} + \sin h(\pi D/2b) \sqrt{1-K^{12}}}{\sqrt{1+\sin^2 h(\pi D/2b)} - \sin h(\pi D/2b) \sqrt{1-K^{12}}} \right)$$

.....(25)

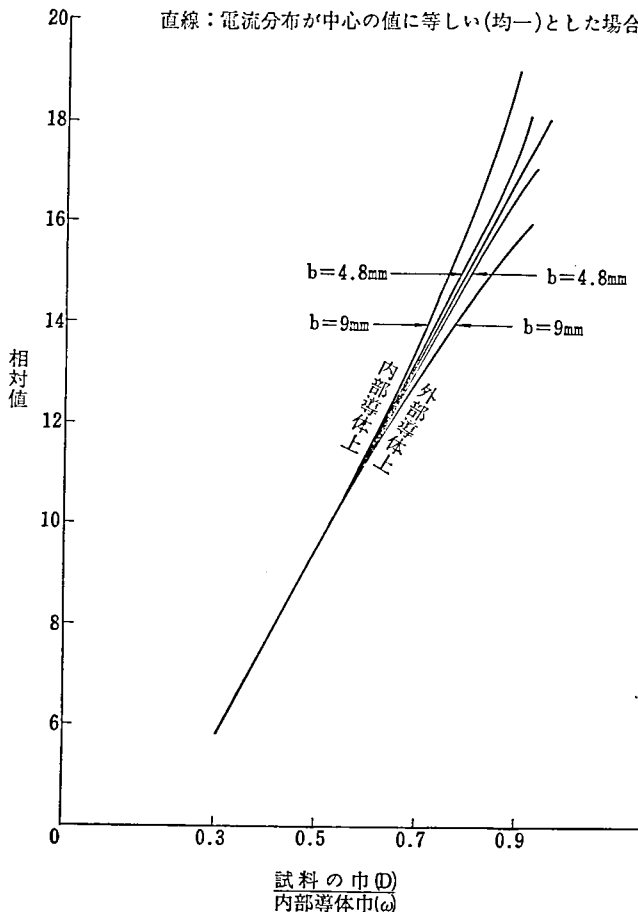
電流分布が一定で導作中心の値に等しい場合には

$$\int_{V'} m \vec{H}_a^2 dV \cong I_0^2 DqS$$

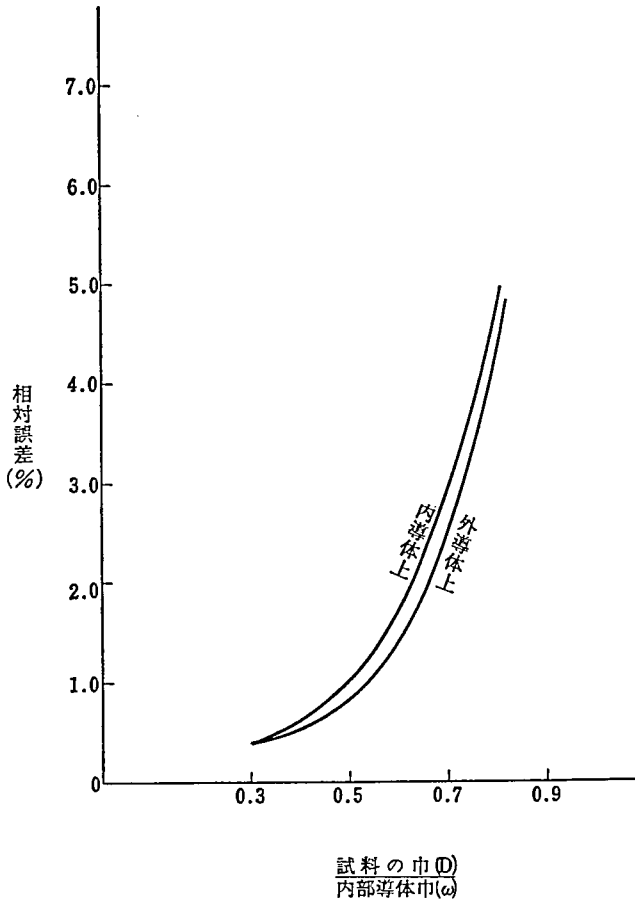
.....(26)

となる。ここに $K = \tan h \left(\frac{\pi W}{2b} \right)$, $K^1 = 1 - K^2$, D , q , S , はそれぞれ試料の巾, 厚さ, および長さである。

ここで(24), (25)式と(26)式の結果を比較して第10図, 第11図(9), (10)に示す。この図より, 内外部導体とも, 巾の50%以内の試料を用いれば α_{μ}' の変化は無視し得ることがわかる。



第10図 ストリップラインの内部及び外部導体上の
或る巾に於ける $\int_0^{D/2} I^2 dx$

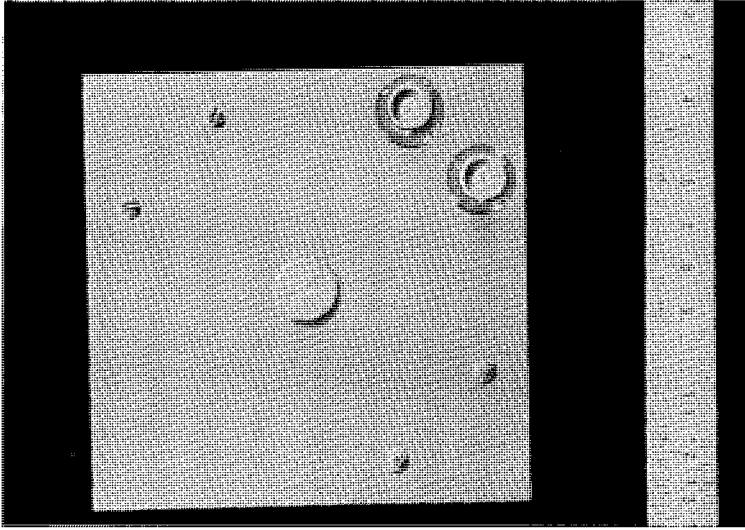


第11図 電流分布が均一であるとした場合の相対誤差

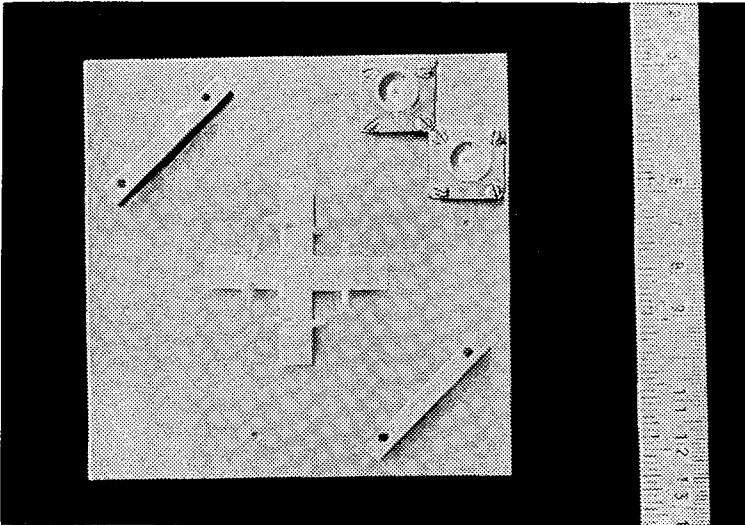
これらのことを総合すると、実際問題となると α_{μ}' は1に近いけれども端効果のために生じる誤差、磁界分布上の誤差などのために、結局実験によって決定する必要がある。しかし $D < 0.5W$ であれば直径が変化する度に α_{μ}' を求めなおす必要はない。このための実験が非磁性金属の薄円板を用いるメタルテストである。これは寸法が表波深さより充分大きいなら金属導体の μ が0であることを利用し、薄円板の厚さを変化させ、 $4\lambda/\lambda$ と $4V/V$ の関係求めて α_{μ}' を実測するものである。ⁱⁱⁱ

実際に試作した共振器は 3.4GHz, 1.0GHz および 100MHz の三種であり、それらの写真第12図から第14図として掲げた通りである。

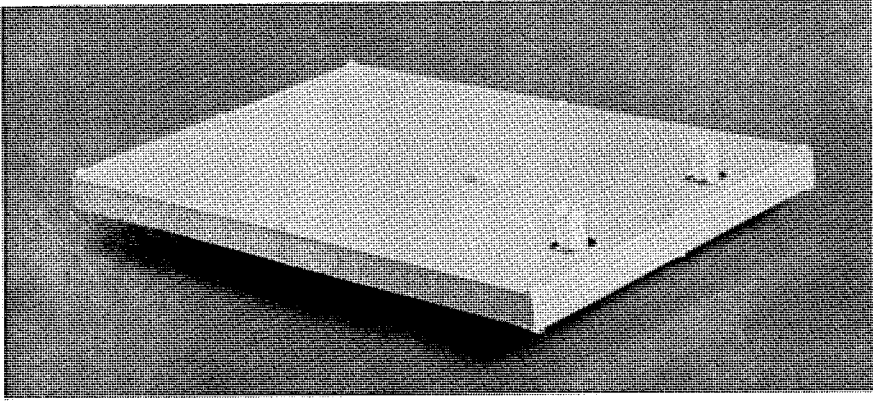
第15図はメタルテストの結果の例である。直径がこの程度であれば厚さの影響は α_{μ}' に無関係で単に $4V$ の変化として作用するのみであることがわかる。



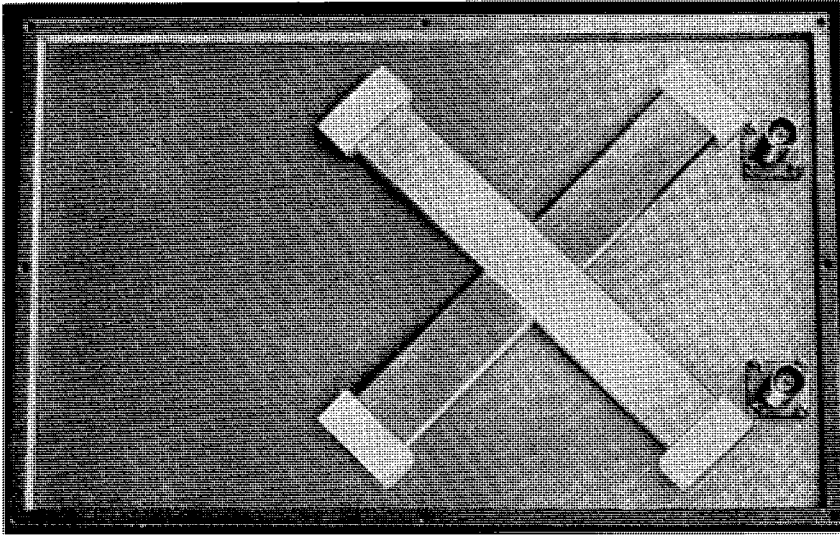
第12図A 3.4 GHz 十字ストリップライン共振器
外 観



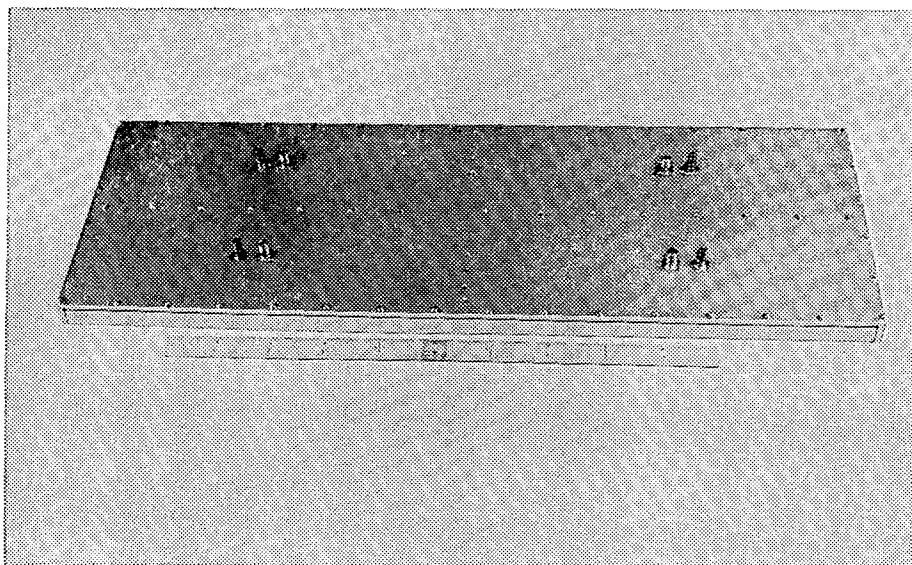
第12図B 3.4 GHz 十字ストリップライン共振器
内 部 構 造



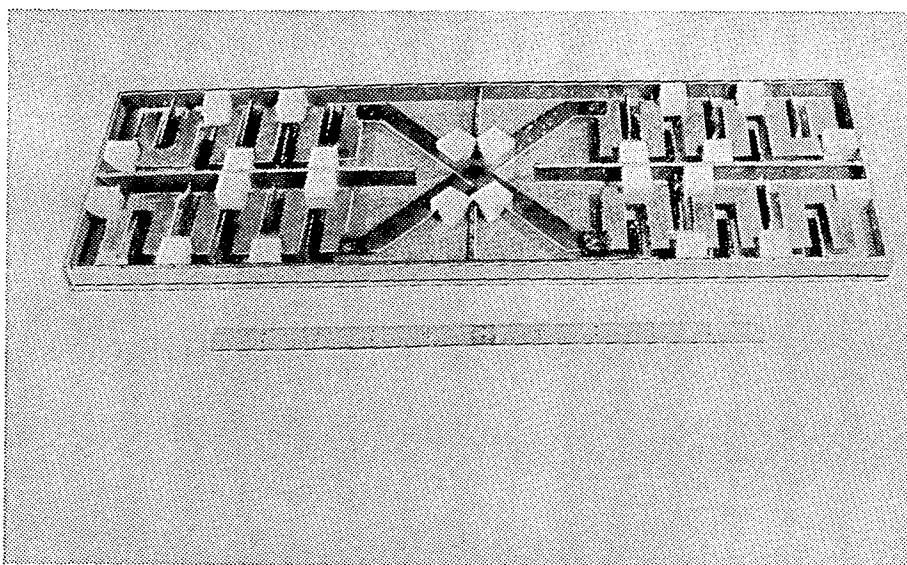
第13図A 1GHz十字ストリップライン共振器
外 観



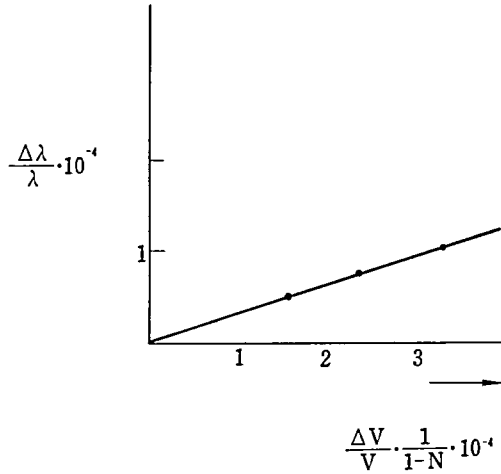
第13図B 1GHz十字ストリップライン共振器
内 部 構 造



第14図A 100MHz十字ストリップライン共振器
外 観



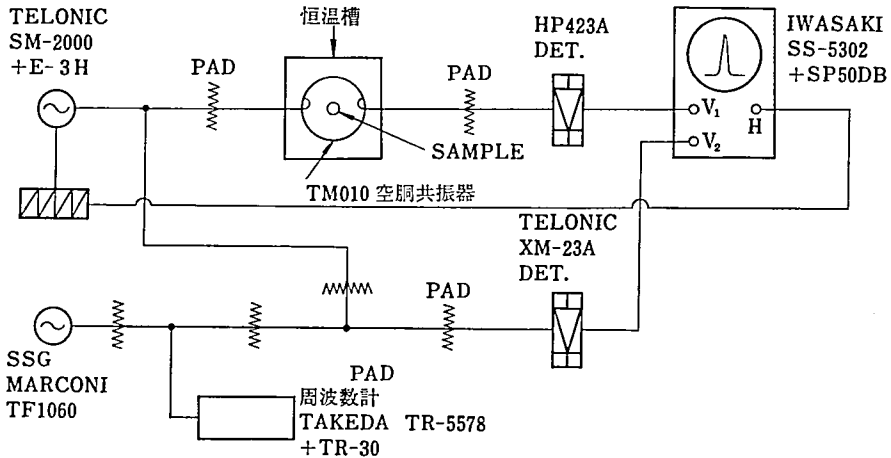
第14図B 100MHz十字ストリップライン共振器
内 部 構 造



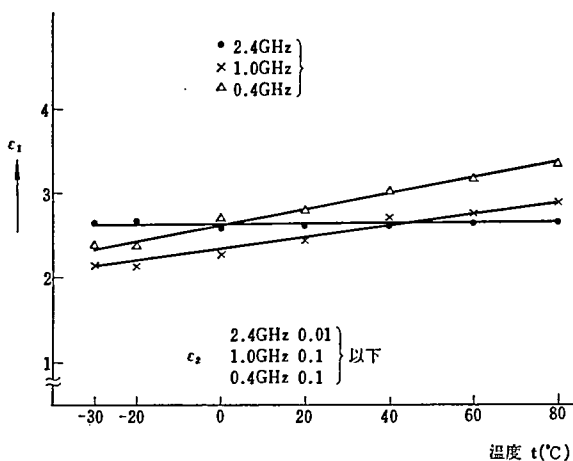
第15図 1GHzにおける $\alpha\mu$ の測定

5. ϵ の測定

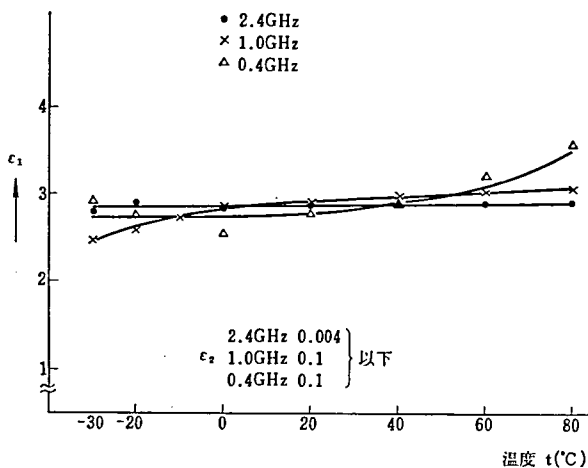
前述の空洞共振器を用い、鐘淵化学(株)製カネクロール[®] 300, 500, および 1,000 三菱石油(株)製高圧絶縁油の四種類に対し、 -20°C より $+80^{\circ}\text{C}$ に至る温度範囲にわたって行なった。実験回路は第16図に、測定回路およびその結果は第17図より第21図に示した通とである。このうちの一部は既に発表した^{22, 23}が、これら四種類の試料は本測定範囲では相当優れた特性を有することが明らかである。しかしながら特に前三者は実用となると毒性の問題もあるので現在シリコン油につき実験を継続中である。



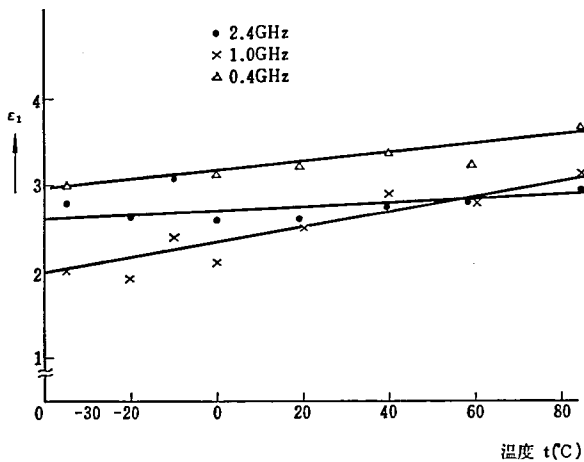
第16図 2.4, 1.0, 0.4 GHz の測定回路



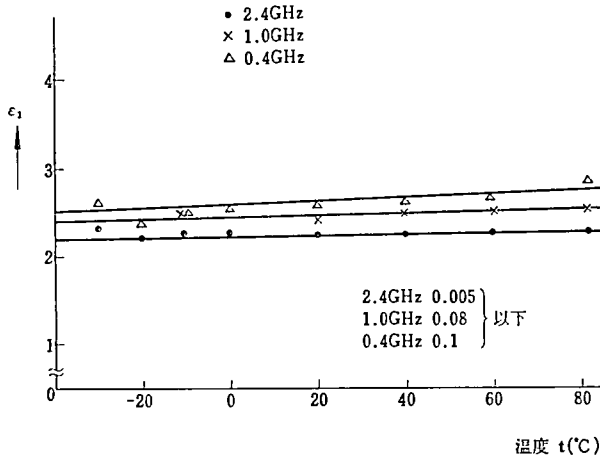
第17図 カネクロール500測定結果



第18図 カネクロール300測定結果



第19図 カネクロール1000測定結果



第20図 絶縁油測定結果

試料 f(GHz)	カネクロール 300	カネクロール 500	カネクロール 1000	絶縁油
2.4	$\frac{1}{708}$	$\frac{1}{574}$	$\frac{1}{2287}$	$\frac{1}{574}$
1.0	$\frac{1}{1870}$	$\frac{1}{1515}$	$\frac{1}{6047}$	$\frac{1}{1515}$
0.4	$\frac{1}{1890}$	$\frac{1}{1515}$	$\frac{1}{6047}$	$\frac{1}{1515}$

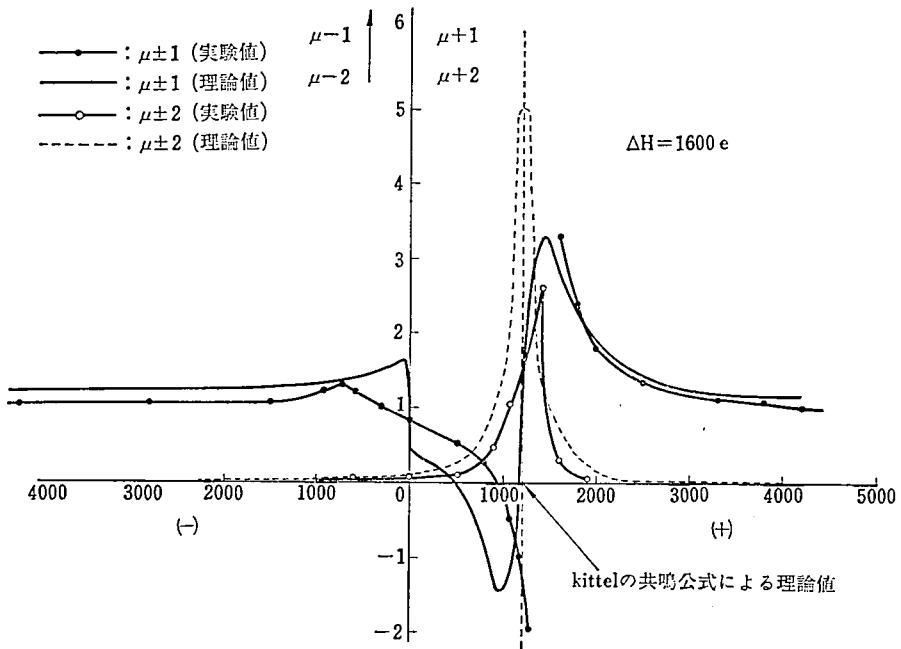
第21図 試料測定周波数と $\Delta V/V$ の関係

6. μ の測定

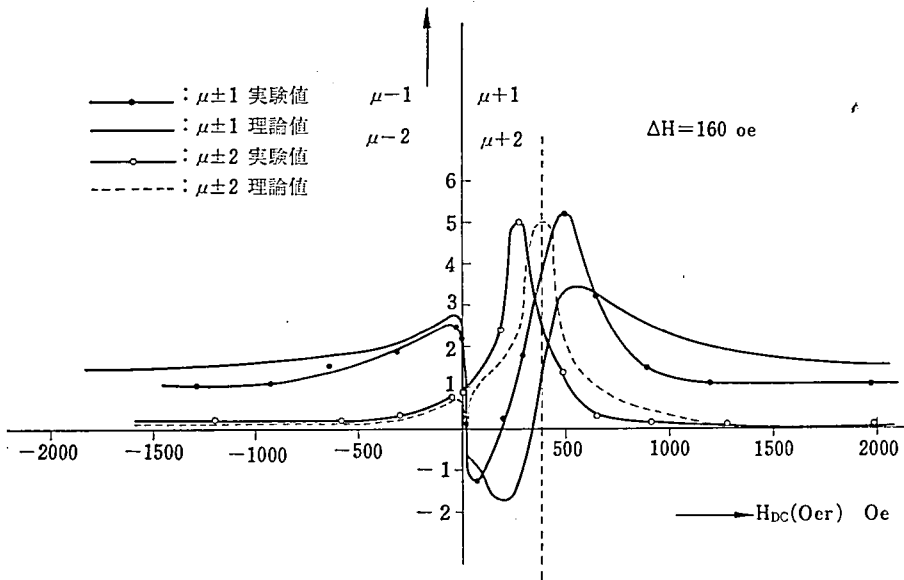
前述の十字ストリップライン共振器により、試料フェライトとしてTDK-E製G-26の薄円板を用い、3.4GHz、1.1GHz、および100μHzの三周波数において測定を行なった。前二者の結果は第22図および第23図として示した通りである。^{44, 45}測定回路は既に発表した通り^{45, 46}であるので省略する。

この程度の特性であれば十分にこれらの周波数帯におけるサーキュレータ、アイソレータとして使用が可能である。

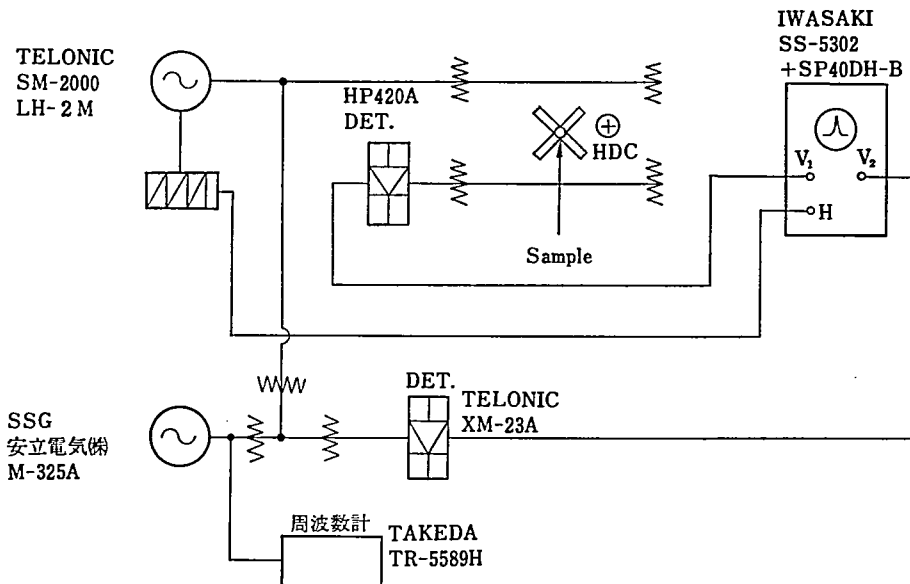
100 μHz用の共振器は、波長が3mともなるので、メアンダーライン型として見掛は上の長さの短縮をはかり、1/4λ遅延線として同軸ケーブル3D2Vを用いた。共振器自体のQは約450であり測定用として充分実用になる。測定回路は第24図として掲げた通りである。測定結果は第25図として掲げた通りである。参考のため計算値も併記しているが比較的良好に一致している。この程度の特性であれば共鳴型単向回路用として使用可能であり、既に同回路の実験結果は報告した^{47, 48}通りであるが、順方向において μ_{-2} が0とならないので回路損失が存在し実用の目的としては更にフェライトを選ばなくてはならない。



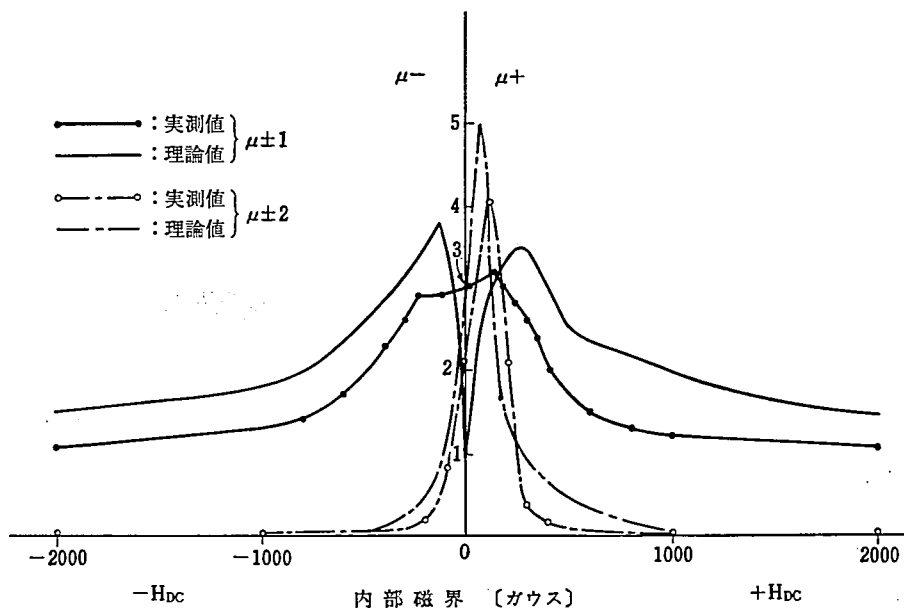
第 22 図 3.4 GHz に於ける内部磁界とテンソル透磁率の実験値及び理論値との関係



第 23 図 1.1 GHz に於ける内部磁界とテンソル透磁率の実験値と理論値の関係



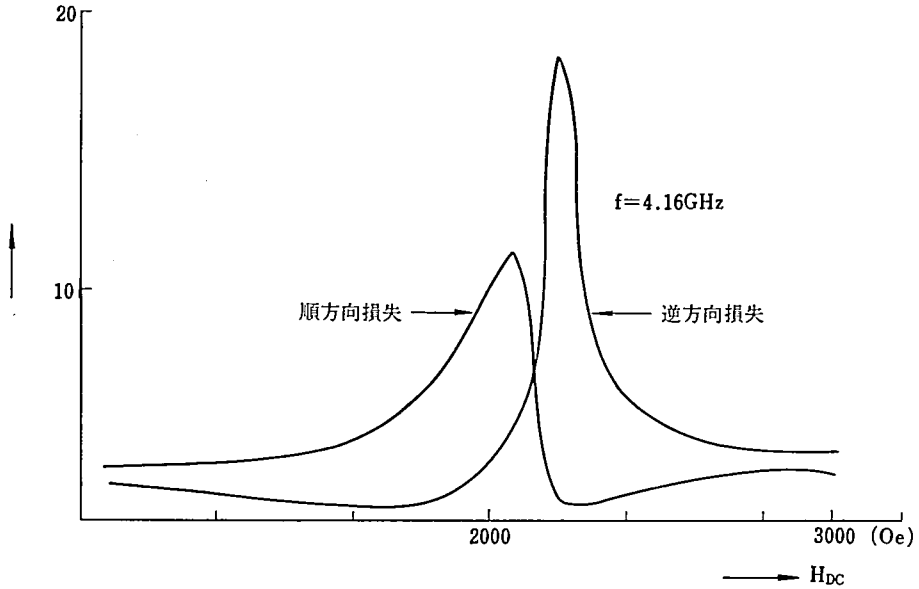
第24図 100 MHz 測定回路



第25図 100 MHz に於ける内部磁界とテンソル透磁率の実験値及び理論値との関係

7. 大電力サーキュレータの設計

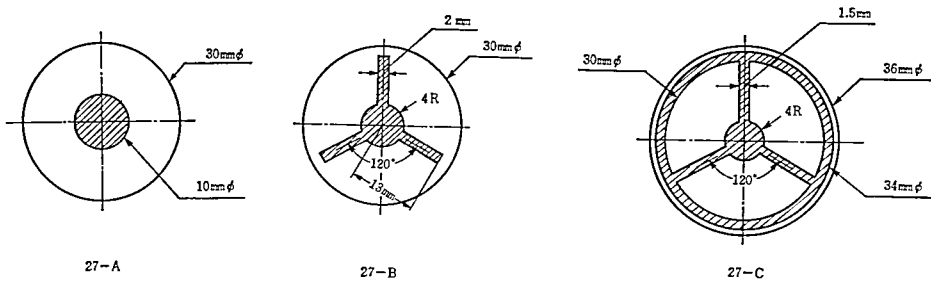
前掲のテンソル透磁率の測定データはサーキュレータの設計に有用である。第26図にストリップラインYサーキュレータの4GHzにおける実測値を掲げた⁶⁾がこれは前掲のデータから予想される磁界の位置と大略一致している。従って問題はフェライトの温度特性と大電力特性である。



第26図 4GHz帯サーキュレーターに於ける H_{DC} と損失の関係

一般的に、大電力を取り扱う場合においては、ストリップライン型にせよ導波管型にせよ先づ冷却が問題となる。これは現在見られる全てが導波管等の外部導作の外側から液冷等の手段で冷却を行なっている次第である。

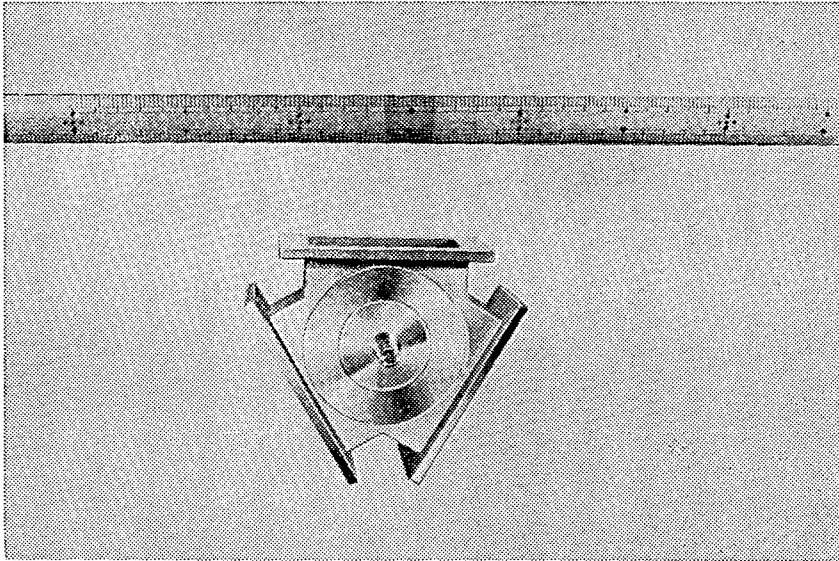
筆者は更に高電力に堪え得る様、導波管内のフェライトを直接冷却することを考えた。これはフェライトを例えば第27図に示したような形状として導波管に装置して冷却液を通すものである。この考えのもとに試作された大電力サーキュレータの写真を第28図として掲げた。(高さは全て34mmである。ハッチ部は冷却液を示す。)



第27図 大電力サーキュレータ用フェライトの構造図

ここで問題なことは、冷却剤として効率がよく、使用用波数帯で $\tan \delta$ が小さく、かつ整合の必要上 ϵ が適当な値である物質を選定することである。現在そのために前述の通り ϵ の測定を行なっている次第である。

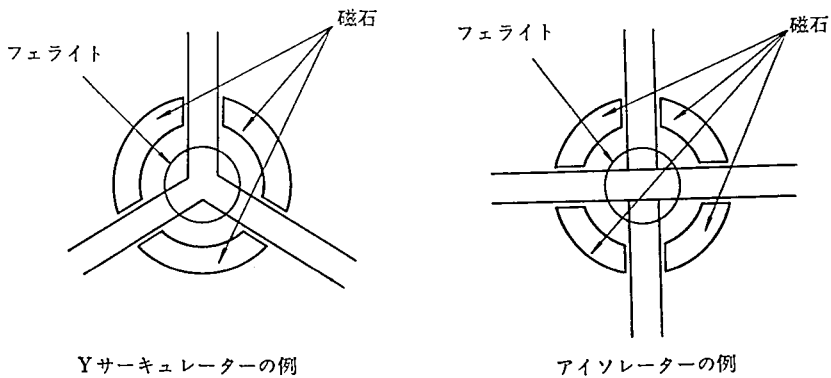
フェライトの大電力特性については、本年度に5MWの出力を有する3GHzの発振器を購入したので試運転の済み次第、実験を行なう予定である。



第28図 Yサーキュレーター

8. 単方向性回路の微小化

VHF帯～UHF帯におけるサーキュレータは現在相当小型なものが市販されている。これらは全て磁石をフェライトの上下方向に配置している。筆者は高さを更に低くし小型化する目的で第29図に示した様に磁石をフェライトの周囲に配置することを考え目下実験中である。この様に配置すると均一磁界が得られ難いのでこの点からもフェライトの形状を円形或は角形のリング状もしくは凹レンズ状にする必要が生じるであろう。理論的に解析を行なっているのが現状である。



第29図 フェライト周囲に磁石を配置した単向回路の例

9. 結 言

以上 VH 帯および UHF 帯における複素誘電率およびテンソル透磁率の測定と単向回路に関する適用について述べた。今後は更に低い周波数帯におけるテンソル透磁率の測定と単向回路の実験を行ない、かつ大電力サーキュレータの研究を完成させる所存である。

末尾乍ら御指導を賜わり、かつ論文の一部の転載を快く許可いただいた都立大学小笠原教授および御援助頂いた日本電気㈱の森田氏を始めとする諸氏に深謝致します。

文 献

- (1) 志方, 松本, 大杉, 中原: 四連大, 1943 (1968-3)
- (2) 小笠原: 電学誌 74, pp 1486-92, 1954 (1954-12)
- (3) 小笠原: 3, pp 126-130, (1957-12)
- (4) 小笠原: 電学誌 75, p 1487 (1955-12)
- (5) 小笠原, 久崎, 志方: マイクロ波伝送専門委 (1961-7-30)
- (6)
- (7) H. M. Altschulen and A. A. Oliner: IRE MTT-8. (1960-5)
- (8) A. A. Oliner: Modern advance in Microwave, Polytechnic Institutø of Brooklin, pp. 379-402. (1955)
- (9) N. Ogasawara and Y. Shikata: Memoirs of Faculty of Tøchrology, The Tokyo Metropolitan
- (10) 小笠原: マイクロ波伝送専門委 (1961-12-6)
- (11) 小笠原: マイクロ波に於けるフェライト応用シンポジウム (1958-10)
- (12) 志方, 植村, 太田: 信学全国大, 455 (1968-10)
- (13) 志方, 植村, 星野: 四連大, 290 (1969-3)
- (14) 小笠原, 志方, 石渡: 信学全国大, 225 (1961-)
- (15) 小笠原, 志方, 石渡, 戸叶: 四連大, 624 (1962-)
- (16) 小笠原, 志方, 山元: 磁性材料研究会, (1962-5-24)
- (17) N. Ogasawara and Y. Shikata: IEEE. 54. pp. 790-792. (1966-5)
- (18) 志方: 明星大学理工学部紀要 第3号, pp. 47-56, (1967-3)